Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum ...

Úloha č. ....

Název úlohy: ....

Jméno: .... Obor: FOF FAF FMUZV

Datum měření: .... Datum odevzdání: ....

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 5	
Teoretická část	0 - 1	
Výsledky měření	0 - 8	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:................................. dne: ....

Pracovní úkoly

1. Ověřte, zda jsou pro dané experimentální uspořádání splněny podmínky platnosti Stokesova vzorce pro odpor prostředí při pohybu koule, určete Reynoldsovo číslo.
2. Změřte dynamickou viskozitu olivového a ricinového oleje Stokesovou metodou.
3. Pro jednu kapalinu proveďte měření s více typy kuliček. Výsledky porovnejte.
4. Hustotu skleněných kuliček určete pyknometrickou metodou.
5. Průměr kuliček d změřte dílenským mikroskopem.
6. Před měřením zvolte pro každou kapalinu odpovídající velikost kuliček.
7. Tuto volbu proveďte na základě odhadu splnění podmínek platnosti Stokesova vzorce. Pro odhad použijte hodnotu viskozity z tabulek. Pro měření jsou připraveny skleněné kuličky o průměru 1 až 4 mm.

[1]

Teorie

Na kuličku padající ve viskózní kapalině působí tři síly. Kromě tíhové a vztlakové je to ještě hydrodynamická síla, kterou lze pro malé v vyjádřit Stokesovým vzorcem

$$F_x = 6\pi\eta r v \tag{1}$$

kde η je dynamická viskozita prostředí, kterou chceme zjistit, a r je poloměr kuličky. Vztah (1) platí pouze pro rychlosti charakterizované Reynoldsovým číslem $Re << 1$, které je definováno vztahem

$$Re = \frac{2r\rho v}{\eta}, \tag{2}$$

kde ρ je viskozita prostředí. [2]

Před samotným měřením ověříme velikosti Re pro různé kuličky, hodnotu r změříme dílenským mikroskopem, hodnotu η vyčteme z tabulky. Rychlost vypočítáme tak, že na odměrném válci vyznačíme vertikální vzdálenost s a změříme čas t, za který jím kulička projde. Potom víme, že $v = s/t$. Je důležité, aby byla rychlost konstantní, proto budeme měřit spíše v dolní části odměrného válce, kde se bude kulička pohybovat už ustálenou mezní rychlostí. Pro vlastní experiment zvolíme takové konfigurace, aby byla podmínka $Re << 1$ splněna. Pro výpočet finální hodnoty budeme používat vzorec

$$\eta = \frac{2r^2\left(\rho_T - \rho\right)g}{9v\left(1 - 2,4r/R\right)}, \tag{3}$$

kde R je poloměr odměrného válce, ρ_T je hustota kuličky a g je místní tíhové zrychlení. [2] Protože se jedná o nepřímé měření, je potřeba odvodit vzorec pro celkovou střední chybu. Ten je následující:

$$u(\eta) = 0,0925926 \sqrt{\begin{aligned}&(g^2 r^6 (\rho - \rho_T)^2 \Delta R^2 \\ &\quad + g^2 r^4 R^2 (\rho - \rho_T)^2 (r - 0,416667R)^2 \Delta v^2 \\ &\quad + g^2 r^4 R^2 v^2 (r - 0,416667R)^2 \Delta \rho^2 \\ &\quad + g^2 r^4 R^2 v^2 (r - 0,416667R)^2 \Delta \rho_T^2 \\ &\quad + g^2 r^2 R^2 v^2 (r - 0,833333R)^2 \Delta r^2 \\ &\quad + r^4 R^2 v^2 (\rho - \rho_T)^2 (r - 0,416667R)^2 \Delta g^2 \\ &)/(v^4 (r - 0,416667R)^4)\end{aligned}} \tag{4}$$

Rychlost kuličky vypočítáme stejně jako v předchozím odstavci. Hustotu kuliček změříme pomocí pyknometru a laboratorních vah – nejprve na váhy postavíme suchý, čistý pyknometr i se zátkou a zapíšeme si jeho váhu jako m_1. Poté ho naplníme rozumným množstvím kuliček (tj. aby jich nebylo jen tak akorát na pokrytí dna, ale zároveň ne až k zábrusu), jejichž hustotu měříme, zazátkujeme, zvážíme a zapíšeme jako m_2. Poté do pyknometru až po okraj přilijeme tekutinu, jejíž hustotu známe (v našem případě destilovanou vodu, u které změříme teplotu), zazátkujeme, pečlivě otřeme, zvážíme a zapíšeme jako m_3. Nakonec pyknometr vylijeme/vysypeme, naplníme ho pouze destilovanou vodou a zvážíme jako m_4. Hustota měřených kuliček je potom dána vztahem:

$$\rho_T = \rho \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1}, \tag{5}$$

kde ρ je hustota kapaliny. [3] Protože je měření pyknometrem případ nepřímého měření, je potřeba odvodit vzorec pro celkovou střední mezní chybu. Ten je následující:

$$u(p_T) = \sqrt{\frac{(m_1 - m_2)^2 (\Delta p^2 (m_1 - m_2 + m_3 - m_4)^2 + p^2 (\Delta m_3^2 + \Delta m_4^2)) + (\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2) p^2 (m_3 - m_4)^2}{(m_1 - m_2 + m_3 - m_4)^4}} \tag{6}$$

Výsledky měření

Pomůcky

- Odměrný válec naplněný olivovým olejem
- Odměrný válec naplněný ricinovým olejem
- Dostatečné množství kuliček různých poloměrů
- Pinzeta
- Teploměr
- Pásové měřidlo
- Posuvné měřidlo

- Dílenský mikroskop
- Stopky
- Pyknometr
- Laboratorní váhy
- Petriho miska a sítko

Podmínky měření

teplota	$22,9$ °C
tlak	$971,6$ hPa
vlhkost vzduchu	$18,5$ %
místo měření	Praha

Zavedené veličiny

l	délka (obecná)
r	poloměr kuličky
R	poloměr válce
h	výška; vertikální dráha kuličky
t	čas
Δt	reakční doba člověka
g	tíhové zrychlení
SG	„specific gravity“ – hustota látky dělená hustotou destilované vody o stejné teplotě
ρ	hustota
ρ_T	hustota kuličky
ρ_V	hustota destilované vody
ρ_O	hustota oleje
T	teplota
η	dynamická viskozita
Re	Reynoldsovo číslo
a, b, c	parametry fitovaných funkcí
$u(X)$	střední směrodatná odchylka veličiny X

Hodnoty z externích zdrojů

Z externích zdrojů jsem získal hodnoty veličin:

$$g = 9,83 \pm 0,01 \text{ m/s}^2 \quad [4] \tag{7}$$

$$\Delta t = 0,627 \pm 0,0695 \text{ s} \quad [5] \tag{8}$$

Vzhledem k tomu, že reakční doba vždy opožďuje reakci a experiment je navržený tak, aby se od sebe zpoždění odečetla, zajímá nás pouze směrodatná odchylka reakční doby. V kombinaci s přesností stopek 0, 01 s dostáváme

$$u(t) = \sqrt{2 \cdot 0,0695^2 + 0,01^2} \text{ s} \approx 0,1 \text{ s} \tag{9}$$

což budeme odteď považovat za směrodatnou odchylku všech časových měření.

Dále jsem si zjistil SG ricinového oleje /1/ a hustotu vody /2/ při různých teplotách, zčehož jsem vypočítal hustotu ricinového oleje /3/ a vytvořil lineární fit závislosti hustoty ricinového oleje na teplotě. Poté jsem z tabulky hustot různých olivových olejů při různých teplotách /4/ vytvořil lineární fit pro závislost hustoty průměrného olivového oleje na teplotě /5/.

Nakonec jsem z tabulek zjistil dynamickou viskozitu olivového a ricinového oleje při různých teplotách a opět provedl lineární fit, výsledek zapsal do tabulky /10/.

Naměřené hodnoty

Jako první veličiny jsem změřil teploty obou olejů, průměr odměrných válců, vertikální vzdálenost mezi značkami na odměrných válcích, mezi kterými budu měřit čas a z lin. fitu vypočítal hustoty obou olejů při naměřené teplotě. Tyto hodnoty jsem zapsal do tabulky /6/.

Poté jsem pomocí dílenského mikroskopu měřil poloměry jednotlivých kuliček, spočítal jsem jejich průměr a směrodatnou odchylku pro každý typ kuličky a výsledky zanesl do tabulky /7/. Směrodatná odchylka reflektuje jednak to, jak se liší poloměry jednotlivých kuliček, ale také jejich křivost/nepravidelnost. Slouží tedy jako orientační ukazatel, jak přesné budou konečné výsledky. Preciznější zohlednění nedokonalostí tvaru kuliček by vyžadovalo delší systematické měření, ideálně pro každou hozenou kuličku.

Následně jsem měřil časy pádu všech kuliček pro výpočet Re. Nejprve jsem experiment prováděl s olivovým olejem, kde jsem výsledek pro každou kuličku změřil třikrát, zjistil průměr a směrodatnou odchylku a výsledky zanesl do tabulky /8/. Poté jsem měřil ricinový olej, kde jsem kvůli větší časové náročnosti měřil časy pouze jednou pro každou z kuliček; naměřené hodnoty jsou zaneseny v tabulce /9/.

Z výsledků v předchozích tabulkách jsem sestavil tabulku /11/, kde jsou všechny veličiny potřebné pro výpočet Reynoldsova čísla. Dynamickou viskozitu jsem vypočítal z lineárního fitu v tabulce /10/ a naměřené teploty z tabulky /6/. Následně jsem vypočítal samotné Reynoldsovo číslo.

Vzhledem k podmínce $Re << 1$ jsem pro samotný pokus zvolil kombinace olivový olej – čirá kulička, ricinový olej – čirá kulička a ricinový olej – žlutá kulička. Kombinace ricinový olej – tyrkysová kulička sice také splňuje podmínku, ale kvůli časové náročnosti jsem se rozhodl, že tyto data už nejsou k přesnému určení zapotřebí.

Následně jsem použil pyknometr ke změření hustoty kuliček. Postupoval jsem podle metodiky nastíněné v sekci Teorie, k výpočtu samotné hustoty jsem použil vzorec (5) a k výpočtu směrodatné odchylky (6), výsledek jsem zapsal do tabulek /12/ a /13/.

Nakonec jsem měřil časy padajících kuliček, pětkrát pro každou z konfigurací, a výsledky jsem zapsal do tabulky /14/ společně se všemi hodnotami relevantními pro výpočet dynamické viskozity.

Tu jsem vypočítal společně s její směrodatnou odchylkou pomocí vzorců (3) a (4) a zapsal do tabulky /14/.

Konečné výsledky mého měření jsou pro konfiguraci čiré kuličky v olivovém oleji:

$$\eta = 130,2 \pm 4,9 \text{ mPa s},$$

pro konfiguraci čiré kuličky v ricinovém oleji:

$$\eta = 1838 \pm 23 \text{ mPa s},$$

a pro konfiguraci žluté kuličky v ricinovém oleji:

$$\eta = 1239 \pm 40 \text{ mPa s}.$$

Ricinový olej /1/				Zdroj
SG · 10^3	960	±5	při 20°C	[6]
	955	±20	při 25°C	[7]
	950	±5	při 40°C	[6]

Voda /2/				Zdroj
ρ [k/m³]	998,203	±0,0005	při 20°C	[9]
	997,044	±0,0005	při 25°C	[9]
	992,25	±0,05	při 40°C	[10]

Ricinový olej /3/ z tabulek /1/ a /2/				Lineární regrese ρ(T) = aT + b	
ρ [kg/m³]	958	±5	při 20°C		
	952	±20	při 25°C	a=	−0,75 ±0,04
	943	±5	při 40°C	b=	973 ±1

Olivový olej /4/		Údaje v tabulce: ρ [kg/m³], Zdroj: [8]								
Typ oleje	T ± 0,5 [°C	11	17	23	29	35	45	55	65	75
1GEV		911,9	911,5	910,6	910,6	909,4	909,2	908,3	907,8	907,1
2GEV		912,0	911,4	911,0	910,5	910,0	908,8	908,3	907,6	907,1
3SEV		911,0	911,2	911,0	910,2	909,8	908,4	908,3	907,6	906,9
4SEV		912,0	911,4	910,7	910,5	909,6	909,2	908,3	907,2	906,0
5SEV		911,9	911,5	911,0	910,4	910,0	909,0	908,3	907,6	907,0
6PEV		912,0	911,5	910,9	909,6	909,9	909,2	908,0	907,6	906,8
7PEV		911,2	911,5	910,1	909,9	910,0	909,0	908,4	907,3	905,8
8PEV		911,6	911,5	911,3	909,9	909,9	902,0	908,6	907,5	906,4
9IEV		911,6	911,4	911,3	910,7	909,9	908,4	908,4	907,5	907,1
10AEV		912,0	911,2	911,2	909,7	909,6	908,9	908,0	906,7	907,3
1PO		911,8	911,7	910,2	910,7	909,3	908,8	908,6	908,0	906,1
2PO		911,9	911,4	911,2	910,5	909,0	909,1	908,1	908,0	906,4
3SO		911,9	911,3	911,0	910,5	909,0	909,1	908,1	907,8	906,4
4SO		911,6	911,4	911,0	910,2	909,0	909,1	908,0	907,8	906,4
Průměr		911,8	911,4	910,9	910,3	909,6	908,5	908,3	907,6	906,6
Směr. odch.		1,1	1,5	1,6	0,9	2,5	1,8	1,1	1,3	1,0

Olivový olej /5/ z tabulky /4/	
a=	−0,08 ±0,003
b=	912,6 ±0,1

Oleje /6/ – naměřená data plus výsledek fitů /3/ a /5/					
	T ± 0,5 [°C]	ρ [kg/m³]	u(ρ) [kg/m³]	R ± 1 [mm]	h ± 2 [mm]
olivový	23,0	911	5	572	149
ricinový	22,5	956	20	595	139

Poloměry kuliček /7/							
Typ kuličky	l_1 ± 0,01 [mm	l_2 ± 0,01 [mi	r = ½(l_2 − l_1) ± 0,014 [m	Δr² [mm²]		[mm]	rel. odch.
žlutá, 1. měření	9,73	6,89	1,42	*2,016*	žlutá průměr.	1,418	93,40%
žlutá, 2. měření	11,70	8,74	1,48	*2,190*	žlutá odch. prům.	1,004	
žlutá, 3. měření	11,68	8,97	1,36	*1,836*	žlutá směr. odch.	1,325	
tyrkys. 1. měření	10,79	8,73	1,03	*1,061*	tyrkys. průměr.	1,022	93,37%
tyrkys. 2. měření	10,68	8,71	0,98	*0,970*	tyrkys odch. prům.	0,723	
tyrkys. 3. měření	11,31	9,21	1,05	*1,103*	tyrkys. směr. odch.	0,954	
čirá, 1. měření	11,13	9,52	0,81	*0,648*	čirá průměr.	0,807	93,34%
čirá, 2. měření	10,97	9,36	0,81	*0,648*	čirá odch. prům.	0,570	
čirá, 3. měření	10,94	9,32	0,81	*0,656*	čirá směr. odch.	0,753	

Časy – olivový olej /8/				
Olivový olej	t ± 0,1 [s]		[mm]	rel. odch.
žlutá, 1. měření	2,02	žlutá průměr.	2,157	5,20%
žlutá, 2. měření	2,27	žlutá odch. prům.	0,073	
žlutá, 3. měření	2,18	žlutá směr. odch.	0,112	
tyrkys. 1. měření	3,36	tyrkys. průměr.	3,357	1,70%
tyrkys. 2. měření	3,35	tyrkys odch. prům.	0,003	
tyrkys. 3. měření	3,36	tyrkys. směr. odch.	0,057	
čirá, 1. měření	11,13	čirá průměr.	11,013	0,88%
čirá, 2. měření	10,97	čirá odch. prům.	0,059	
čirá, 3. měření	10,94	čirá směr. odch.	0,097	

Časy – ricinový olej /9/		
Typ kuličky	t ± 0,1 [s]	rel. odch.
žlutá	25,38	0,39%
tyrkys.	39,56	0,25%
čirá	56,31	0,18%

Viskozita olejů z tabulek /10/						Zdroj: [11]
	T [°C]					
Dyn. visk.	25	30	50	75	100	
olivový η =	67	54	25,8	9,4	7	
ricinový η =	700	451	125	42	16,9	
	f(x) = exp(ax + b) + c					
	a	b	c	Δa	Δb	Δc
olivový	-0,043856	5,23935	3,84088	0,00415	0,09153	1,815
ricinový	-0,083546	8,58785	27,7702	0,008458	0,2118	13,69
			η	Δη		
olivový při naměřené teplotě			72,60	6,97		
ricinový při naměřené teplotě			847	160		

Reynoldsovo číslo /11/									Re = 2rρh/tη	
Kulič., olej	t ± 0,1 [s]	h ± 2 [mm]	r [mm]	u(r)	ρ [kg/m³]	u(ρ)	η [mPa s]	u(η)	Re	u(Re)
žlut., oliv.	2,16	149	1,42	0,05	911	5	72,60	6,97	2,46	0,28
tyrk., oliv.	3,36	149	1,02	0,03	911	5	72,60	6,97	1,14	0,12
čirá, oliv.	5,86	149	0,81	0,00	911	5	72,60	6,97	0,51	0,05
žlut., ricin.	25,38	139	1,42	0,05	956	20	847	160	0,0175	0,0034
tyrk., ricin.	39,56	139	1,02	0,03	956	20	847	160	0,0081	0,0016
čirá, ricin.	56,31	139	0,81	0,00	956	20	847	160	0,0045	0,0009

Pyknometr – čiré kuličky /12/		
	m [g]	u(m) [g]
prázdný	9,1997	0,0005
s kuličkami*	19,8989	0,0005
s kuličkami a dest. H_2O	26,8282	0,0005
s dest. H_2O	19,3451	0,0005
hust. vody: ρ(V) [kg/m³]	997,7	0,2
hust. kulič.: ρ(T) [kg/m³]	3319	31

Pyknometr – žluté kuličky /13/		
	m [g]	u(m) [g]
prázdný	9,3278	0,0005
s kuličkami	18,6617	0,0005
s kuličkami a dest. H_2O	25,0070	0,0005
s dest. H_2O	19,3701	0,0005
hust. vody: ρ(V) [kg/m³]	997,7	0,2
hust. kulič.: ρ(T) [kg/m³]	2519	24

Naměřená viskozita olejů /14/								
Konfigurace	r [mm]	t ± 0,1 [s]	ρ(T) [kg/m³]	ρ(O) [kg/m³]	h ± 2 [mm]	R ± 0,5 [mm]	η [mPa s]	u(η)
olivový, čirá	±0,005		±31	±5				
	0,80	5,51	3319	911	149	28,5	131,8	3,5
	0,80	5,59	3319	911	149	28,5	133,7	3,5
	0,80	5,44	3319	911	149	28,5	131,8	3,5
	0,75	5,91	3319	911	149	28,5	123,6	3,6
	0,79	5,58	3319	911	149	28,5	130,0	3,5
ricinový, čirá	±0,005		±31	±20				
	0,80	72,12	3319	956	139	30	1808	39
	0,80	72,07	3319	956	139	30	1830	39
	0,81	72,25	3319	956	139	30	1882	40
	0,82	69,74	3319	956	139	30	1840	40
	0,82	69,31	3319	956	139	30	1829	39
ricinový, žlutá	±0,05		±24	±20				
	1,47	22,00	2519	956	139	60	1232	33
	1,49	21,87	2519	956	139	60	1259	34
	1,44	23,07	2519	956	139	60	1238	33
	1,53	20,80	2519	956	139	60	1274	34
	1,50	20,45	2519	956	139	60	1194	32

Diskuze výsledků

Pokud porovnáme výsledek naměřený při konfiguraci žlutých kuliček v ricinovém oleji, 1239 ± 40 mPa s, s dynamickou viskozitou ricinového oleje z tabulek 847 ± 160 mPa s /10/, zjistíme, že náš výsledek má relativní chybu $1,46$. Taková chyba je poměrně vysoká, ovšem s přihlédnutím k nejistotám obou hodnot a k variabilitě olejů dostupných na trhu přijatelná.

Zbylé dvě konfigurace oproti tomu mají velmi vysokou relativní chybu (konfigurace čirá—ricinový $2,17$, konfigurace čirá—olivový $1,81$), která naznačuje, že při experimentu došlo k systematické chybě. Důležitým vodítkem zde je, že hodnoty pro žluté kuličky zhruba odpovídají realitě, kdežto hodnoty pro čiré kuličky jsou hrubě zkreslené. Jedinou měřenou hodnotou, která byla měřena pouze jednou (tj. je náchylná na sytematickou chybu) a přímo souvisí s typem kuličky je ρ_T. Pokud tedy zavrhneme naměřenou hustotu čirých kuliček jako nesprávnou a budeme předpokládat, že byly oba druhy kuliček vyrobené ze stejného materiálu a mají tudíž i stejnou hustotu, vyjdou nám poněkud jiné hodnoty – pro olivový olej to je:

$$\eta = 86,9 \pm 3,4 \text{ mPa s},$$

a pro ricinový:

$$\eta = 1216 \pm 18 \text{ mPa s}.$$

Nová hodnota dynamické viskozity pro olivový olej $86,9 \pm 3,4$ mPa s velice přesně souhlasí s viskozitou získanou z tabulek $72,6 \pm 7,0$ mPa s, relativní chyba výsledku je $1,20$. Nová hodnota pro ricinový olej navíc souhlasí s hodnotou naměřenou u žlutých kuliček – relativní chyba nové hodnoty vztažené k hodnotě žlutých kuliček je $0,98$.

Tento výsledek je dostatečně přesvědčivý na to, abych považoval systematickou chybu v měření čirých kuliček za téměř jistou. Nyní se ještě můžeme zamyslet nad původem této chyby. Naměřená hustota kuliček 3319 kg m^{-3} je o 800 kg m^{-3} vyšší, než jakou předpokládáme, a závisí na pěti parametrech: hustotě vody, hmotnosti prázdného pyknometru, hmotnosti pyknometru s kuličkami, hmotnosti pyknometru s kuličkami a vodou, a hmotnosti pyknometru naplněného jen vodou.

Hustota vody s nejvyšší pravděpodobností příčinou chyby není, protože je vyčtená z tabulek a stejná jako u měření hustoty žlutých kuliček. Hmotnost prázndého pyknometru bychom museli snížit o 2 g, abychom se dostali na požadovanou hodnotu – není ovšem příliš pravděpodobné, že bych na vahách při měření měl pyknometr a navíc ještě nějaký dvougramový předmět.

Stejně tak by musela být o gram nižší hmotnost pyknometru s kuličkami a vodou. Jediný faktor, který by mohl zvýšit naměřenou hmotnost oproti ideálnímu případu, je možnost, že jsem před vážením pyknometr dostatečně neutřel. Ale 1 g vody na povrchu pyknometru je přeci jen poměrně vysoké číslo.

Hustota pyknometru naplněného vodou by musela být ve skutečnosti o gram vyšší než naměřená hodnota, abychom dosáhli požadovaného výsledku, což nepravděpodobné.

Nakonec hustota pyknometru s kuličkami by musela ve skutečnosti být o 2 g vyšší než naměřená hodnota. To by mohlo být způsobené tím, že jsem při měření pyknometr zapomněl zazátkovat. Hmotnost 2 g by rozměrům a materiálu zátky odpovídala. Navíc při tomto měření není v pyknometru žádná kapalina, takže je snadné na zátku zapomenout. Proto je tato hypotéza nejpravděpodobnějším vysvětlením systematické chyby výsledku.

Závěr

První výsledky hrubě neodpovídaly realitě. To vedlo k objevení systematické chyby v měření hustoty čirých kuliček. Po opravě této systematické chyby již výsledky vycházejí správně s vysokou přesností. Abychom si však mohli výsledkem být jistí, bylo by třeba hustotu čirých kuliček znovu přeměřit.

Literatura

[1] PIEŠOVÁ, Jaroslava et al. (XIX) Volný pád koule ve viskózní kapalině. *Základní fyzikální praktikum: ... vše o fyzikálním praktiku najdete právě na těchto stránkách* [online]. Praha, 3. 5. 2017 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: `http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/119`

[2] *XIX. Volný pád koule ve viskózní kapalině* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: `http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_119.pdf`

[3] *Pyknometrická metoda pro určení hustoty kapalin a pevných látek* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: `http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_119_pyknometr.pdf`.

[4] *Gravity of Earth in Prague.* WolframAlpha [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.wolframalpha.com/input/?i=gravity+of+earth+in+prague

[5] NAGLER, Charles Arthur a William Merle NAGLER. Reaction time measurements. *Forensic Science* [online]. 1973, 2, 261-274 [cit. 2018-03-16]. DOI: 10.1016/0300-9432(73)90041-1. ISSN 03009432. Dostupné z: `http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0300943273900411`

[6] *Specific Gravity Chart* [online]. In: BINMASTER. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: `https://www.binmaster.com/_resources/dyn/files/75340090z876d0c14/_fn`

[7] Castor oil. *TOXNET: Toxicology Data Network* [online]. 09/23/1988 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: `https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/r?dbs+hsdb:@term+@rn+@rel+8001-79-4`

[8] RIBEIRO, Elisa Franco et al. *Thermophysical properties of different olive oils: Evaluating density and rheology through a fluid dynamic approach* [online]. 2017 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: `https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejlt.201600316`

[9] DUNCAN, Jeremiah. Density of Water (g/mL) vs. Temperature (deg C). *Dr. Jeremiah Duncan's Homepage* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: `http://jupiter.plymouth.edu/~jsduncan/courses/2012_Spring/Techniques/Exams/DensityOfWater-vs-Temp.pdf`

[10] Water - Density, Specific Weight and Thermal Expantion Coefficient. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: `https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html`

[11] 2.2.3 Viscosities. *Kayne and Laby Online: Tables of Physical and Chemical Constants* [online]. 1995 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_2/2_2_3.html